干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

doi:10.12118/j.issn.1000-6060.2019.05.11

基于 *SPI* 的黑龙江省干旱时空特征分析①

于家瑞[1]， 艾 萍[1,2]， 袁定波[1]， 熊传圣[1]
(1 河海大学水文水资源学院,江苏 南京 210098； 2 河海大学计算机与信息学院,江苏 南京 210098)

摘 要: 利用黑龙江省 10 个气象站点 1953—2015 年逐日降水数据,计算不同尺度下的标准化降水指数(*SPI*),并结合游程理论分析黑龙江省干旱的时空演变特征。结果表明:降水仍是黑龙江省干旱的主要影响因素;黑龙江省干旱夏季和秋季呈增强趋势,*SPI* 变化速率分别为每 10 a 下降0.029、0.135,春旱和冬旱呈缓解趋势,速率为每 10 a 上升 0.061、0.074,年 *SPI* 变化速率为每 10 a 下降 0.044;黑龙江省 20 世纪 60 年代中后期~70 年代末,干旱较为频繁,且干旱的持续时间长、干旱程度大、干旱强度大,出现了 1974—1980 年的连续干旱期,80 年代~90 年代中期较为正常,90 年代末及之后,干旱频率及其持续时间、程度、强度呈增加趋势;干旱事件的持续时间从西北向东南呈增加—减少趋势,黑龙江省中部的干旱事件持续时间最长。

关 键 词: 干旱; 黑龙江省; *SPI*; 时空特征

干旱是人类面临的主要自然灾害之一,其特点是波及范围广、持续时间长、影响行业多[1]。黑龙江省地处湿润半湿润地区,是我国的产粮大省,干旱的频繁发生严重影响了黑龙江省的粮食产量,进而影响我国的粮食安全。受干旱影响,黑龙江省 1949—1990 年粮食减产 2.39×10^{10} kg[2];2010 年黑龙江省出现两次干旱过程,对农业的影响较大;2011 年,干旱共造成农作物受灾面积 7.03×10^{5} hm^2,绝收面积 3.00×10^{4} hm^2;2012 年干旱造成黑龙江省农作物受灾面积 1.20×10^{6} hm^2,直接损失达 1.23×10^{9} 元。因此,对黑龙江省干旱的时空特征进行深入研究的需求更加迫切。

孙滨峰等[3]利用标准化降水蒸发指数研究了东北地区的干旱时空特征,利用主成分分析和聚类分析将东北划分为 8 个干旱相似区,黑龙江省大部分地处干旱增加区;赵茹欣等[4]运用标准化降水指数(*SPI*)和主成分分析法对黑龙江省气象干旱的时空特征进行了分析,得出黑龙江省气象干旱空间分布呈现整体一致性和西北—东南对立分布两种态势,以及在 2000 年后干旱趋势显著的结论;马建勇等[5]运用 *SPI* 和相对湿润指数对东北地区 5~9 月干旱趋势进行了分析,得出黑龙江省大部分地区呈干旱化趋势的结论。当前多数研究都是基于某种指数对黑龙江省的干旱进行评估,重点关注干旱发生的频率、程度、分布特征,对于干旱的持续时间、时空演变特征的研究较少。芦佳玉等[6]运用标准化降水蒸发指数、游程理论以及经验正交函数对云贵地区干旱历时以及干旱强度的变化规律及特征进行了研究,较好的揭示了云贵地区干旱变化趋势;杨好周等[7]运用游程理论结合降水距平百分率来估计区域干旱历时的重现期,认为该方法确实能够为确定干旱的分布规律提供依据。

SPI 作为一种计算简单、适用于多尺度且较为准确的干旱指数,在东北地区获得了较为广泛的应用[8-9]。本文利用 *SPI* 对黑龙江省干旱进行评估,并结合游程理论,分析黑龙江省干旱的持续时间、时空演变等特征,以期为农业抗旱、灌溉以及水资源规划提供科学依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

黑龙江省位于我国最东北部(121°11′~135°05′E,43°25′~53°33′N;图1)。黑龙江省西北

① 收稿日期: 2019-02-15; 修订日期: 2019-06-22
基金项目: 国家自然科学基金重点国际(地区)合作研究项目(51420105014)
作者简介: 于家瑞(1995-),男,硕士研究生,研究方向为水文不确定性理论与应用. E-mail:550582868@qq.com

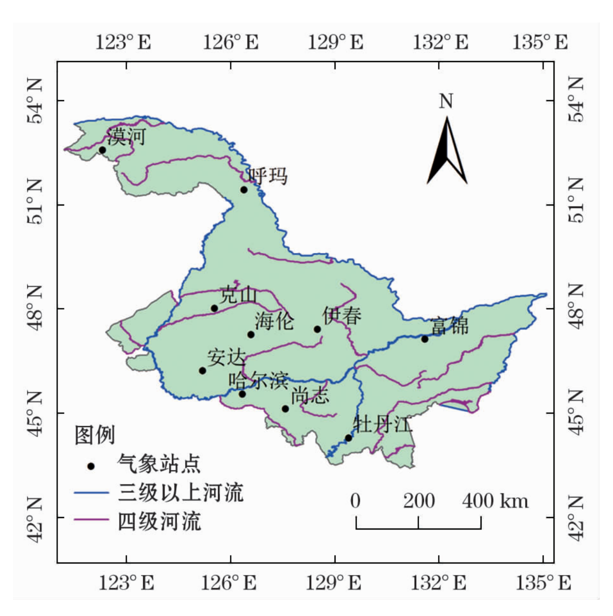


图 1　研究区气象站点分布

Fig. 1　Location and meteorological stations of Heilongjiang Province

部为东北—西南走向的大兴安岭山地,北部为西北—东南走向的小兴安岭山地,东北部为三江平原,东南部为东北—西南走向的张广才岭、老爷岭、完达山。地势西北部、北部、东南部高,东北部、西南部低。黑龙江省属寒温带大陆性气候,春季少雨干旱,夏季湿热多雨,秋季冷凉,冬季漫长干燥。多年平均气温 -5 ~5 ℃,由南向北降低。年降水量 400 ~650 mm,中部山区多,西、北部少。

1.2　数据来源

本文所用的数据来源于中国气象局发布的《中国地面气候资料日值数据集》中黑龙江省 10 个地面基准气象观测站 1953—2015 年的逐日降水数据和气温数据,且选择的站点分布较为均匀,该资料是无缺值连续资料,在我国气候研究中已得到广泛认可和应用。63 a 的数据资料,时间跨度较大,可在一定程度上反映黑龙江省的降水变化情况,代表性较好。

1.3　研究方法

1.3.1　标准化降水指数　标准化降水指数(*SPI*)认为降水量分布不是正态分布,而是一种偏态分布,采用 Γ 分布概率来描述降水量的分布,计算出降水量 Γ 分布概率后,经正态标准化处理,最终用标准化的降水累积频率分布来划分干旱等级。*SPI*1、*SPI*3、*SPI*6 和 *SPI*12 分别指 1、3、6 个月和 12 个月尺度的 *SPI* 值。具体计算公式可参考国家气候中心制定的《气象干旱等级标准》。等级划分见表 1。

表 1　标准化降水指数(*SPI*)干旱等级划分

Tab. 1　Classification scales for *SPI*

干旱等级	指数范围
无旱	$SPI > -0.5$
轻旱	$-1 < SPI \leq -0.5$
中旱	$-1.5 < SPI \leq -1$
重旱	$-2 < SPI \leq -1.5$
特旱	$SPI \leq -2$

1.3.2　游程理论　一个有限取值序列中,满足一定条件的同一符号(即同类事件)的一连串称为一个“游程”,一个游程中同一符号连续出现的次数为游程长度[10]。袁文平[11]也指出,引起干旱有两种直接原因,一个是当前的降水缺乏引起的土壤水分亏缺,另一个是长期的降水缺乏导致的用于补给的水分亏缺。持续时间久的 $SPI<0$ 事件会导致水资源不足,产生与干旱有关的问题[12],因此将 $SPI \leq 0$ 时定义为发生了一次干旱事件,游程长度为干旱持续时间(D;$D=1,2,3,\cdots$月),在游程中反映干旱事件累积干旱缺水状况为干旱程度 S,公式如下:

$$S = \sum_{j=1}^{D} SPI_j \tag{1}$$

反映干旱事件平均干旱缺水状况为干旱强度 I,公式如下:

$$I = \frac{S}{D} \tag{2}$$

式中:$0<I<1$ 时为轻度干旱;当 $1 \leq I<1.5$ 时为中度干旱;当 $1.5 \leq I<2$ 时为重度干旱;当 $I \geq 2$ 时为极端干旱。

2　结果分析

2.1　*SPI* 适用性验证

干旱的实质是水分亏缺,其与降水、气温密切相关[13],二者都可以影响水分情况,气温是通过潜在蒸发量影响地区水分,进而对干旱的发生产生影响。本文对降水、气温以及 Thornthwaite 方法计算的潜在蒸发量进行计算分析,结果表明(表 2),降水多年均值为 438.26 mm,潜在蒸发量仅为 29.82 mm,在东北作物生长关键期(5 ~9 月),降水最大倾向率为 -5.56,而潜在蒸发量仅为 0.22。可见,由气温引起的潜在蒸发量,多年来量级较小且变化较小,降水量无论是量还是变化程度,都是潜在蒸发量的数倍,因此在黑龙江省,降水仍是干旱的主要影响因

表 2　黑龙江省降水与潜在蒸发量

Tab. 2　Precipitation characteristics and potential evaporation characteristics in Heilongjiang Province

月份	均值 / mm		倾向率 / mm · a^{-1}	
	降水	潜在蒸发量	降水	潜在蒸发量
1	39.60	0.00	-0.07	0.00
2	43.82	0.00	0.06	0.00
3	96.37	0.00	0.48	0.00
4	224.42	2.90	0.11	0.11
5	449.18	43.03	1.56	0.22
6	826.35	77.58	1.39	0.18
7	1 418.42	94.73	0.68	0.06
8	1 144.98	86.72	-2.93	0.05
9	592.24	49.62	-5.56	0.03
10	258.48	3.22	-0.12	0.06
11	98.37	0.00	0.78	0.00
12	66.86	0.00	0.65	0.00
平均	438.26	29.82		

子,可以用 *SPI* 来研究黑龙江干旱情况。

本文以黑龙江省 2004 年、2010 年、2011 年干旱事件记载,与 3 个时间尺度的 *SPI* 值对比,来验证其适用性。据记载,2004 年春播前期土壤干旱,5 月降水偏多,6 月全省发生大规模严重干旱;2004 年春旱连初夏旱;2010 年 5 月降水为 1961 年以来历史同期最多,后春至初夏干旱,9 月干旱严重;2011 年 8 月部分地区出现重旱,入秋后发生干旱。从表 3、图 2 中可知,*SPI*1 在 2014 年识别出 2 次干旱,4 月监测结果为轻旱,6 月为重旱,在 2010 年识别出 2 次干旱,6 月(-0.88)是轻旱,9 月是重旱,在 2011 年监测出 3 次干旱,为 8 月、9 月和 10 月,均监测为轻旱;*SPI*3 的结果表明,在 2004 年 4~6 月干旱,即春旱以及初夏旱,在 2010 年仅识别出 1 次干旱,8~9 月干旱,等级为中旱,2011 年 8~10 月均为中旱,

表 3　黑龙江省 2004 年、2010 年和 2011 年部分月 *SPI*1、*SPI*3、*SPI*12 值

Tab. 3　*SPI*1、*SPI*3 and *SPI*12 in Heilongjiang Province in 2004,2010 and 2011

年份	月份	*SPI*1	*SPI*3	*SPI*12
2004	4	-0.90	-1.00	-1.01
	5	0.78	-0.54	-0.58
	6	-1.90	-1.03	-0.72
2010	6	-0.88	-0.13	-0.48
	9	-1.54	-1.35	-0.75
2011	8	-0.67	-1.34	-0.15
	9	-0.93	-1.24	-0.08
	10	-0.95	-1.08	0.71

即入秋后干旱;*SPI*12 在 2014 年 4~6 月监测出干旱,在 2010 年 9~12 月识别出 1 次干旱。可见随着时间尺度的增加,干旱等级会发生变化,干旱持续时间变长,这也充分说明了前期降水的累计影响。时间尺度越小,*SPI* 对于一次降水或短期降水的变化越显著,值的变化幅度大,甚至是正负变化,时间尺度越大,则对于一次降水的反应越不显著,只有持续的多次降水才会使其发生波动。这对于监测长时间的水分变化情况是合理的[14]。以上分析表明,*SPI* 与黑龙江省干旱记载较为吻合,能较好的反应黑龙江省的干旱情况,且 *SPI*1 和 *SPI*3 可以用来分析黑龙江省短期的干旱特征,*SPI*12 可以用来分析黑龙江省长期的干旱变化。

2.2　干旱变化特征

不同季节变化及等级频次的分布存在较大差异,如图 3 所示,夏秋两季的变化速率分别为每 10 a 下降 0.029 和 0.135,春冬两季的变化速率为每 10 a 增长 0.061 和 0.074,说明从长期变化趋势上看,黑龙江省夏季与秋季干旱呈增强趋势,冬季和春季干旱呈减轻趋势,且秋季趋势要强于夏季。春季干旱的频次为 18 次,夏季干旱的频次为 19 次,秋季干旱的频次为 20 次,冬季干旱的频次为 17 次,发生干旱的频率分别为 28.57%、30.16%、31.57% 和 26.98%;极旱季分别出现在 1992 年春季(*SPI* 值为 -1.31),1954 年和 2007 年夏季(*SPI* 值分别为 -1.86 和 -1.55),2001 年秋季(-1.66)以及 1967 年冬季(-2.32)。据《中国气象灾害年鉴》中记载,2007 年夏季,黑龙江大部分地区高温少雨,发生了历史罕见的夏旱,平均降水量为 143.1 mm,为历年同期次少值(仅次于 1954 年)。

图 4 所示,黑龙江省近 63 a 的 *SPI* 值呈弱降低趋势,速率为每 10 a 下降 0.044,干旱年的频次为 16 次。20 世纪 60 年代,黑龙江省干旱的频率约为 3 a 一次,70 年代约为 2 a 一次,80 年代约为 5 a 一次,90 年代约为 3 a 一次,2000—2009 年,约为2.5 a 一次。黑龙江省在 70 年代干旱最为频繁,在 80~90 年代略有减缓,在 2000 年之后,干旱频率开始上升。

2.3　干旱事件时间变化特征

在 1 个月尺度、3 个月尺度和 12 个月尺度下,将一次干旱事件开始的年份作为该次事件的名称。据图 5 可知,1 个月尺度、3 个月尺度、12 个月尺度干旱事件持续时间的变化率分别为每10 a下降

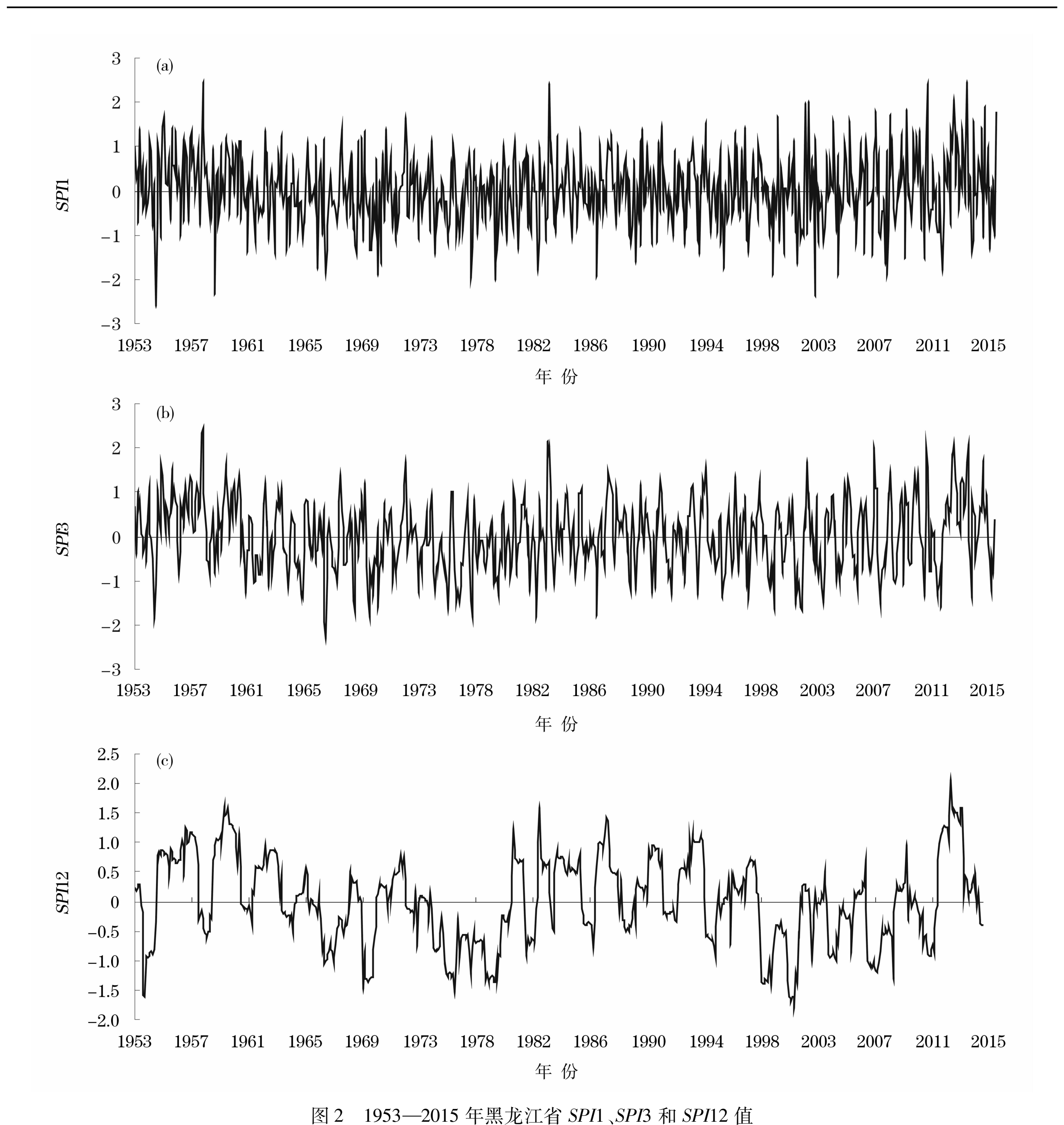


图 2　1953—2015 年黑龙江省 *SPI*1、*SPI*3 和 *SPI*12 值

Fig. 2　*SPI*1, *SPI*3 and *SPI*12 in Heilongjiang Province during 1953—2015

0.006、0.022 和 1.014，平均持续时间为 3.44 个月、5.14 个月、12.38 个月。1 个月尺度下干旱时间持续时间在 1～8 月之间，持续时间最长的是 2002 年 11 月开始的干旱事件，持续了 8 个月；3 个月尺度下，持续时间最长的是 1974 年 10 月开始的干旱事件，持续了 16 个月；12 个月尺度下，持续时间最长的是 1974 年 9 月开始的干旱事件，持续了 71 个月。在 1974 年 9 月～1980 年 8 月这 71 个月里，1 个月和 3 个月的 *SPI* 识别出多次干旱事件，持续时间较 12 个月的要小，1 个月尺度下，识别出 17 次干旱事件，持续时间介于 1～7 个月之间，三个月持续下识别出 8 次干旱事件，持续时间介于 3～16 个月之间。1 个月尺度下，1974—1977 年是干旱事件持续时间最长的阶段，1978—2001 年是干旱事件持续较短的阶段，2001 年之后，干旱时间持续时间又开始增多。3 个月尺度下，1964—1967 年、1974—1979 年是干旱事件持续较长的阶段，1980—1998 年是干旱时间持续时间较短的阶段，之后持续时间又开始增多。12 个月尺度下，1974—1980 年是干旱事件持续最长的阶段，之后1981—1996年是持续时间较短的阶

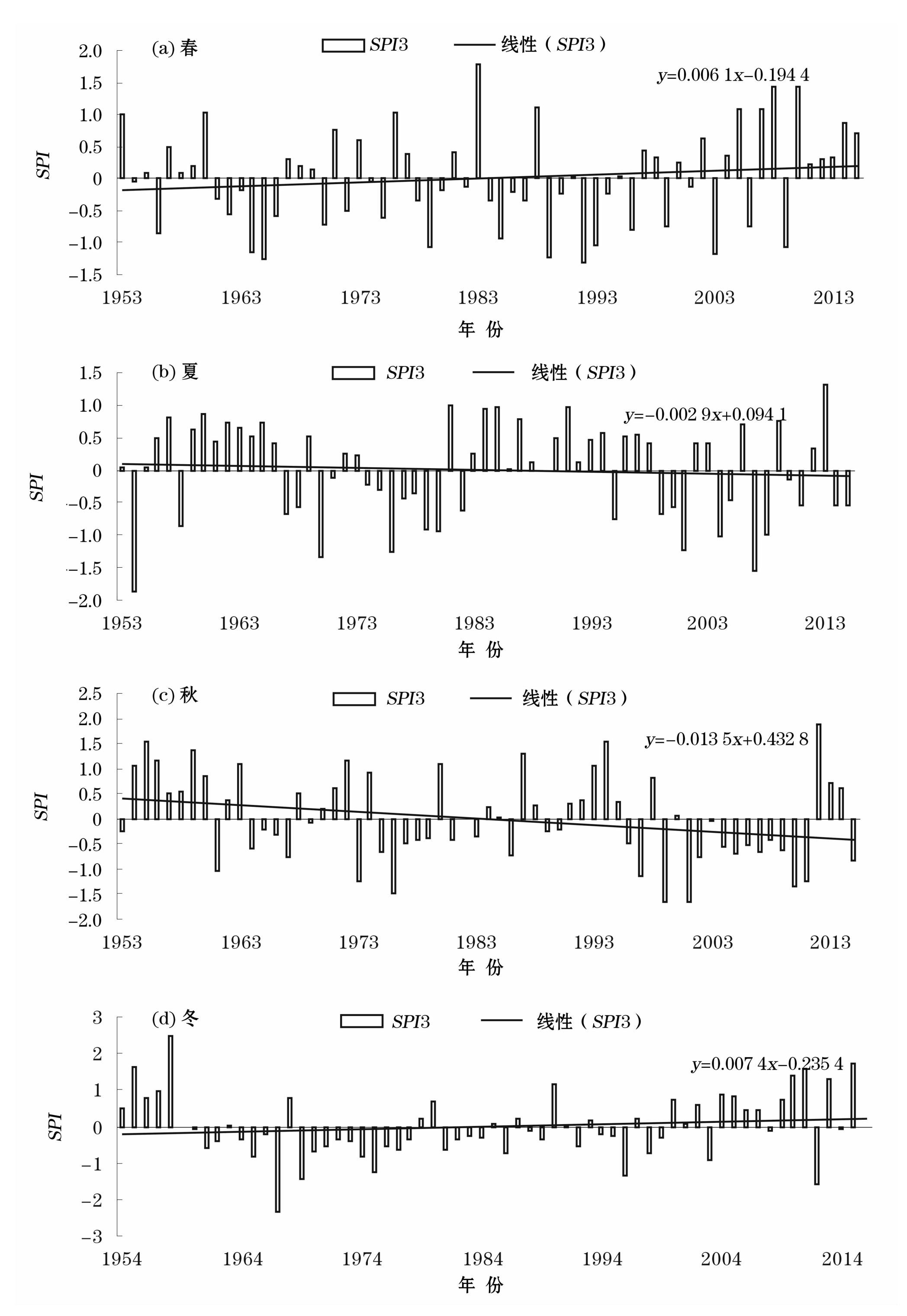


图 3　1953—2015 年黑龙江四季的 *SPI* 值变化

Fig. 3　Change of different seasons *SPI* in Heilongjiang Province during 1953—2015

段,之后持续时间开始增多。通过上述分析,3 个尺度下的干旱事件持续时间的变化趋势是基本一致的,在时间上的一些差异,可能是由于小尺度 *SPI* 对一次降水较更大尺度的要更敏感。

由图 6 可以看出,1 个月、3 个月尺度下,干旱程度变化的速率分别为每 10 a 上升 0.005 和 0.02,12 个月尺度下,干旱程度变化的速率为每 10 a 下降 0.395,平均干旱程度分别为 1.27、2.27 和 6.38。1 个月尺度下,1966 年 11 月开始的干旱事件干旱程度最大,为 4.78;3 个月尺度下,1974 年 10 月开始的干旱事件干旱程度最大,为 10.19;12 个月尺度下,1974年9月开始的干旱事件干旱程度最大,为

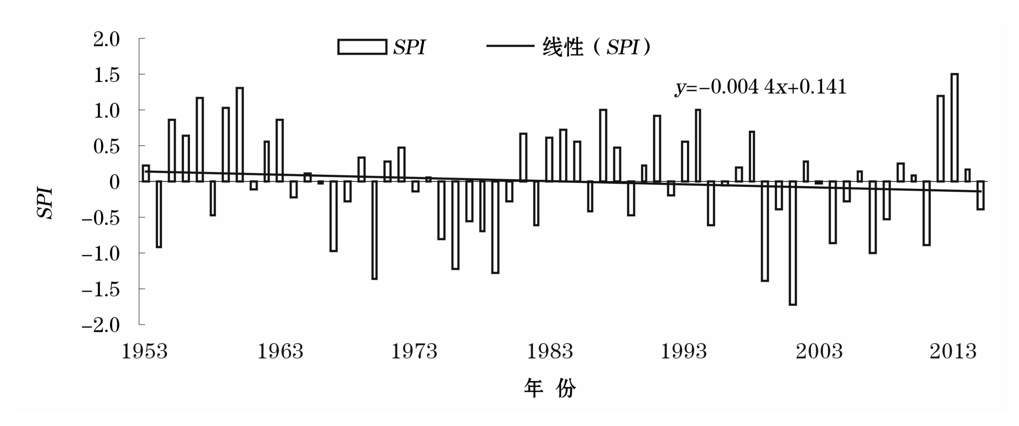


图 4　1953—2015 年黑龙江省年 *SPI* 值变化

Fig. 4　Evolution of annual *SPI* in Heilongjiang Province during 1953—2015

图 5　1953—2015 年黑龙江省 *SPI*1、*SPI*3 和 *SPI*12 干旱持续时间变化

Fig. 5　Changes of *SPI*1, *SPI*3 and *SPI*12 drought events duration in Heilongjiang Province during 1953—2015

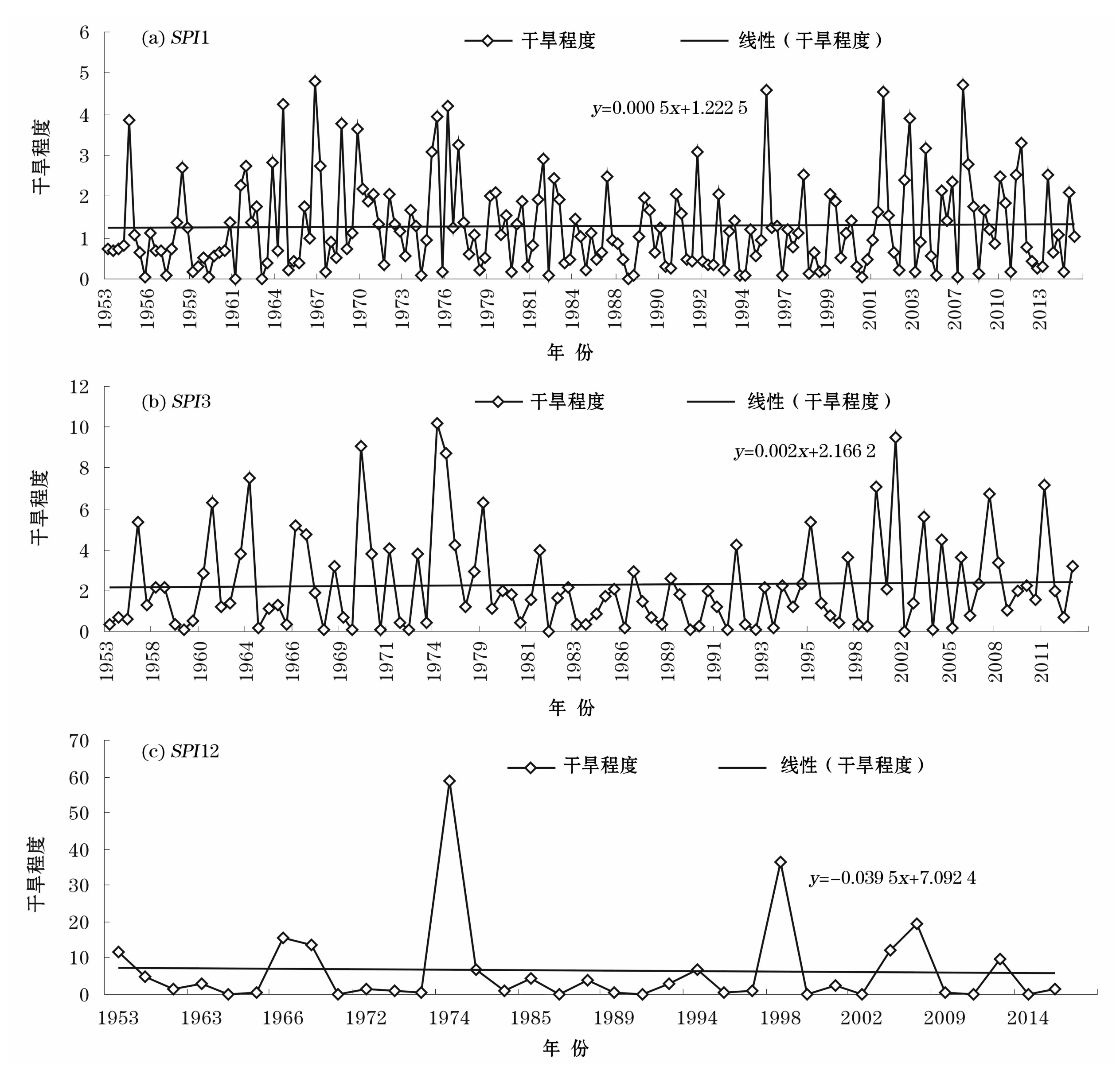


图 6　1953—2015 年黑龙江省 *SPI*1、*SPI*3 和 *SPI*12 干旱事件干旱程度变化

Fig. 6　Changes of *SPI*1, *SPI*3 and *SPI*12 drought events severity in Heilongjiang Province during 1953—2015

58.9。从整体上看,干旱程度与干旱持续时间的分布相似。1 个月尺度下,1964—1969 年、1974—1976 年是干旱程度较大的阶段,之后 1977—2000 年是干旱程度较小的阶段,2000 年以后干旱程度增加。3 月尺度下,1969 年、1974—1976 年是干旱程度较大阶段,之后干旱程度较小,直到 1999 年开始变大。12 个月尺度下,1974—1980 年是干旱程度较大阶段,之后干旱程度较小,至 1998 年开始增大。从整体上看,3 个尺度下干旱程度变化的趋势也基本一致。

由图 7 可以看出,1 个月和 3 个月尺度下,干旱强度变化的速率分别为每 10 a 上升 0.006 和 0.01,12 个月尺度下,干旱强度变化的速率为每 10 a 下降 0.012,平均干旱强度分别为 0.61、0.52 和 0.37。1 个月尺度下,2002 年 9 月开始的干旱事件,干旱强度最大,为 2.39;4 个月尺度下,1968 年 12 月开始的干旱事件,干旱强度最大,为 1.59;12 个月尺度下,1998 年 9 月开始的干旱事件,干旱强度最大,为 1.02。从整体上看,干旱强度的趋势同干旱持续时间、干旱程度相似,但在具体时间上与两者有一定的区别。如 1 个月尺度下,1964—1967 年、1974—1976 年是干旱持续时间较长和干旱程度较大的阶段,但干旱强度却不是最大;3 个月尺度下,干旱强度最大的是 1968 年 12 月开始的干旱事件,而非在 1974—1976 年阶段里;12 个月尺度下,干旱强度最大的是 1998 年 9 月开始的干旱事件,1974—1980 年阶段的干旱强度是第 4 大值。

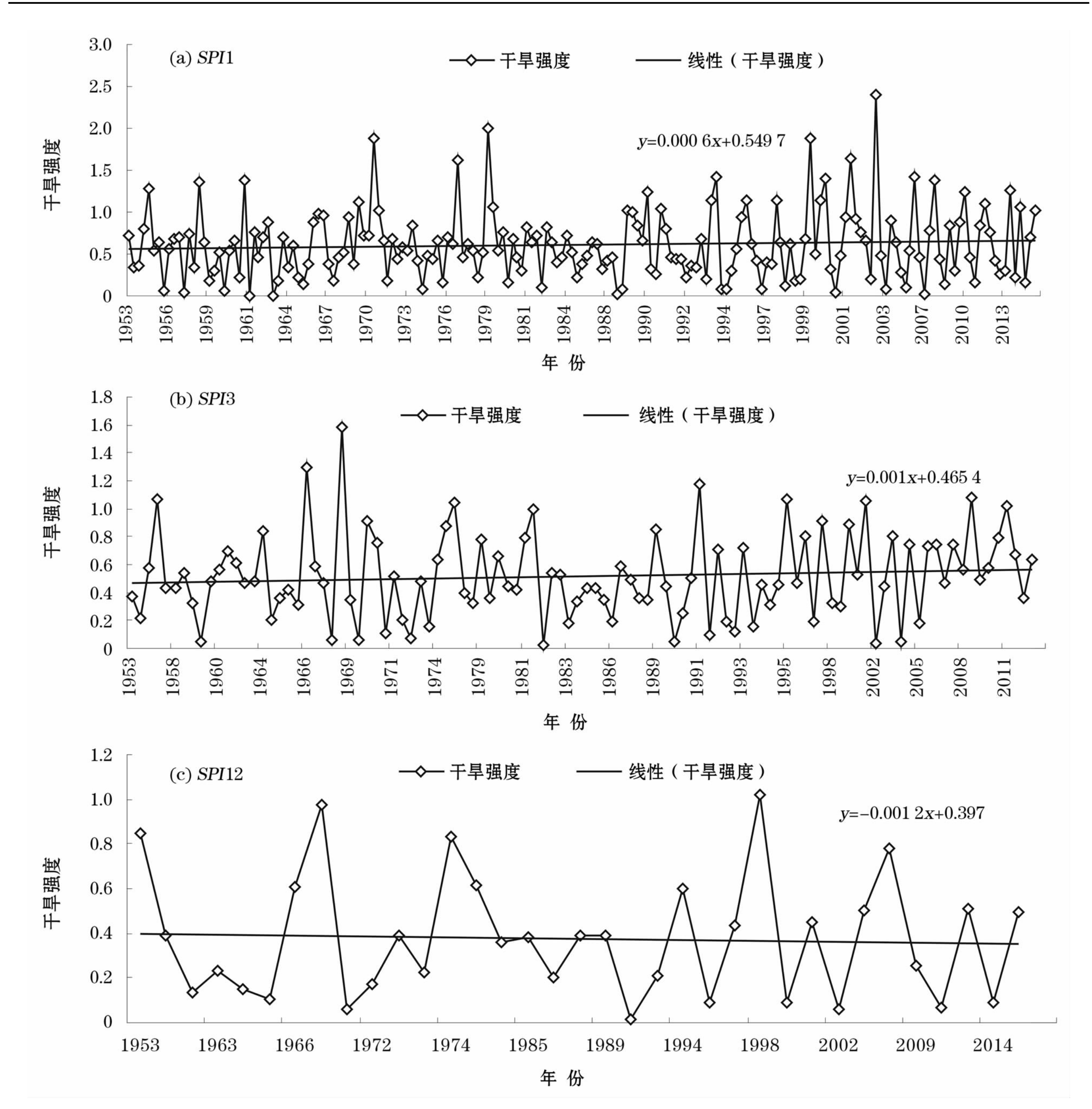


图 7　1953—2015 年黑龙江省 *SPI*1、*SPI*3 和 *SPI*12 干旱事件干旱强度变化

Fig. 7　Changes of *SPI*1, *SPI*3 and *SPI*12 drought events intensity in Heilongjiang Province during 1953—2015

黑龙江省干旱事件在时间上的变化特征，从整体上来说，大致可以分为 4 个阶段：(1) 20 世纪 60 年代以前，发生持续时间长、干旱程度大或干旱强度大的干旱事件较少。(2) 60 年代到 70 年代末，黑龙江省呈现干旱化现象，发生连续性干旱，干旱程度大，强度较大。(3) 80 年代到 90 年代中期，干旱事件的持续时间较短，干旱程度较小，干旱强度较小。(4) 90 年代末及 2000 年以后，干旱事件的持续时间开始变长，干旱程度增大，干旱强度增大。上述结果与王学哲等[15]利用修正 Z 指数对黑龙江省旱涝时空特性的分析基本一致，与韩晓君[16]统计的黑龙江省历史记录相吻合。

2.4　干旱事件空间变化特征

如表 4 所示，1 个月尺度下，黑龙江省牡丹江干旱事件持续时间最短，为 2.76 个月，尚志的持续时间最长，为 3.43 个月；3 个月尺度下，哈尔滨市干旱事件持续时间最短，为 4.43 个月，安达最长，为 5.64个月；12 个月尺度下，克山持续时间最短，为 10.70 个月，海伦最长，为 13.46 个月。黑龙江省，从西北向东南，干旱事件持续时间平均值呈增加—减少趋势，在黑龙江省中部，干旱的持续时间最长。

1个月和3个月尺度下，干旱事件干旱程度的

表 4　黑龙江省不同地区 1953—2015 年 *SPI*1、*SPI*3 和 *SPI*12 干旱事件

Tab. 4　*SPI*1, *SPI*3 and *SPI*12 drought events features in different areas in Heilongjiang Province during 1953—2015

站点	干旱持续时间/月			干旱程度			干旱强度		
	*SPI*1	*SPI*3	*SPI*12	*SPI*1	*SPI*3	*SPI*12	*SPI*1	*SPI*3	*SPI*12
克山	2.86	4.81	10.70	2.45	4.37	9.05	1.15	0.92	0.47
海伦	2.92	4.48	13.46	2.57	3.87	11.77	1.06	0.85	0.59
安达	3.05	5.64	13.42	2.79	4.70	11.97	1.05	0.81	0.65
哈尔滨	3.24	4.43	12.15	2.58	3.96	10.10	0.93	0.90	0.65
尚志	3.43	4.79	11.27	2.83	4.44	10.19	1.03	0.95	0.68
牡丹江	2.76	4.72	11.23	2.36	4.07	9.19	1.01	0.88	0.53

空间变化不明显,其值分别在 2.36 ~ 2.83 与3.87 ~ 4.70 间波动,12 个月尺度下,干旱事件干旱程度的变化明显大于 1 个月和 3 个月尺度,其最大值在安达,为 11.97,最小值在克山,为 9.05。

干旱事件强度的空间分布差异不明显。1 个月尺度下,干旱强度最大值位于克山,最小值位于哈尔滨,差值为 0.23;3 个月尺度下,干旱强度最大值位于尚志,最小值在安达,差值为 0.14;12 个月尺度下,干旱强度最大值在尚志,最小值在克山,差值为 0.21。

3　结 论

(1) *SPI* 能较好的反应黑龙江省的干旱情况,时间尺度越小,*SPI* 对于一次降水或短期降水的变化越显著。

(2) 夏季与秋季干旱呈增强趋势,冬季和春季干旱呈减轻趋势,且秋季趋势要强于夏季,总体上,黑龙江省干旱呈弱增加趋势。

(3) 黑龙江省 20 世纪 60 年代中后期至 70 年代末,干旱较为频繁,且干旱的持续时间长、干旱程度大、干旱强度大,80 年代至 90 年代中期较为正常,90 年代末及之后,干旱频率及其持续时间、程度、强度呈增加趋势。且时间尺度越小,持续时间、干旱程度以及干旱强度的值变化幅度越大。1974—1980 年是黑龙江省干旱较为严重的阶段。

(4) 黑龙江省干旱事件的持续时间从西北向东南呈增加—减少趋势,黑龙江省中部的干旱事件持续时间最长。干旱程度及干旱强度在空间上分布的差异不明显。

参考文献(References)

[1] 陈晓楠,段春青,刘昌明,等. 基于两层土壤计算模式的农业干旱风险评估模型[J]. 农业工程学报,2009,25(9):51 - 55. [CHEN Xiaonan, DUAN Chunqing, LIU Changming, et al. Model of risk assessment for agricultural drought based on two-layer soil computing model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2009,25(9):51 - 55.]

[2] 周秀杰,那济海,潘华盛. 黑龙江省夏季干旱气候特征及成因分析[J]. 自然灾害学报,2011,20(5):131 - 135. [ZHOU Xiujie, NA Jihai, PAN Huasheng. Climatic characteristics and cause of summer drought in Heilongjiang Province[J]. Journal of Natural Disasters,2011,20(5):22 - 28.]

[3] 孙滨峰,赵红,王效科. 基于标准化降水蒸发指数(SPEI)的东北干旱时空特征[J]. 生态环境学报,2015,24(1):22 - 28. [SUN Binfeng, ZHAO Hong, WANG Xiaoke. Spatiotemporal characteristics of drought in Northeast China based on SPEI[J]. Ecology and Environmental Sciences,2015,24(1):22 - 28.]

[4] 赵茹欣,王会肖,杨会彩,等. 基于标准降水指数的黑龙江省气象干旱特征分析[J]. 节水灌溉,2017(12):56 - 62. [ZHAO Ruxin, WANG Huixiao, YANG Huicai, et al. Meteorological drought characteristics in Heilongjiang Province based on standardized precipitation index[J]. Water Saving Irrigation,2017(12):56 - 62.]

[5] 马建勇,许吟隆,潘婕. 基于 SPI 与相对湿润度指数的 1961—2009 年东北地区 5 ~ 9 月干旱趋势分析[J]. 气象与环境学报,2012,28(3):90 - 95. [MA Jianyong, XU Yinlong, PAN Jie. Drought tendency based on standardized precipitation index (SPI) and relative moisture index over Northeast China from May to September during 1961—2009[J]. Journal of Meteorology and Environment,2012,28(3):90 - 95.]

[6] 芦佳玉,延军平,李英杰. 基于 SPEI 及游程理论的云贵地区 1960—2014 年干旱时空变化特征[J]. 浙江大学学报(理学版),2018,45(3):363 - 372. [LU Jiayu, YAN Junping, LI Yingjie. The temporal variation characteristics of drought in Yunnan-Guizhou area during 1960 to 2014 based on SPEI and run-length theory[J]. Journal of Zhejiang University (Science Edition),2018,45(3):996 - 1007.]

[7] 杨好周,梁忠民,胡义明,等. 游程理论在云南省干旱重现期分析中的应用[J]. 水电能源科学,2013,31(12):8 - 12. [YANG Haozhou, LIANG Zhongmin, HU Yiming, et al. Application of run-length theory to drought return period analysis of Yunnan Province[J]. Water Resources and Power,2013,31(12):8 - 12.]

[8] 邹文秀,韩晓增,江恒,等. 东北黑土区降水特征及其对土壤水分的影响[J]. 农业工程学报,2011,27(9):196 - 202. [ZHOU Wenxiu, HAN Xiaozeng, JIANG Heng, et al. Characteristics of precipitation in black soil region and response of soil moisture dynamics in Northeast China[J]. Transactions of the CSAE,2011,27(9):196 - 202.]

[9] 卢洪健,莫兴国,孟德娟,等. 气候变化背景下东北地区气象干

旱的时空演变特征[J]. 地理科学,2015,35(8):1051－1059. [LU Hongjian,MO Xingguo,MENG Dejuan,et al. Analyzing spatiotemporal patterns of meteorological drought and its responses to climate change across Northeast China[J]. Scientia Geographica Sinica,2015,35(8):1051－1059.]

[10] 张利利,周俊菊,张恒玮,等. 基于SPI的石羊河流域气候干湿变化及干旱事件的时空格局特征研究[J]. 生态学报,2017,37(3):996－1007. [ZHANG Lili,ZHOU Junju,ZHANG Hengwei,et al. Temporal and spatial patterns of climate drought-wet and drought event based on standard precipitation index in Shiyang River Basin[J]. Acta Ecologica Sinica,2017,37(3):996－1007.]

[11] 袁文平,周广胜. 标准化降水指标与Z指数在我国应用的对比分析[J]. 植物生态学报,2004,28(4):523－529. [YUAN Wenping,ZHOU Guangsheng. Comparison between standardized precipitation index and Z-index in China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology,2004,28(4):523－529.]

[12] 肖名忠,张强,陈晓宏. 基于多变量概率分析的珠江流域干旱特征研究[J]. 地理学报,2012,67(1):83－92. [XIAO Mingzhong,ZHANG Qiang,CHEN Xiaohong. Spatial-temporal patterns of drought risk across the Pearl River Basin[J]. Acta Geographica Sinica,2012,67(1):83－92.]

[13] 章大全,张璐,杨杰,等. 近50年中国降水及温度变化在干旱形成中的影响[J]. 物理学报,2010,59(1):655－663. [ZHANG Daquan,ZHANG Lu,YANG Jie,et al. The impact of temperature and precipitation variation on drought in China in last 50 years[J]. Acta Physica Sinica,2010,59(1):655－663.]

[14] SEILER R A,HAYES M,BRESSAN L. Using the standardized precipitation index for flood risk monitoring[J]. International Journal of Climatology,2002,22(11).

[15] 王学哲,孙才志,曹永强. 基于修正Z指数的黑龙江省旱涝时空特性分析[J]. 水电能源科学,2017,35(10):1－4. [WANG Xuezhe,SUN Caizhi,CAO Yongqiang. Spatio-temporal characteristics of drought and flood in Heilongjiang Province based on the revised Z index[J]. Water Resources and Power,2017,35(10):1－4.]

[16] 韩晓君. 黑龙江省旱涝特征分析[J]. 东北水利水电,1999,(1):27－28. [HANG Xiaojun. Characteristics of drought and waterlogging in Heilongjiang Province[J]. Water Resources & Hydropower of Northeast China,1999,(1):27－28.]

Spatial-temporal characteristics of drought in Heilongjiang Province based on standardized precipitation index

YU Jia-rui[1], AI Ping[1,2], YUAN Ding-bo[1], XIONG Chuan-sheng[1]

(1 *College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing* 210098, *Jiangsu, China*;
2 *College of Computer and Information, Hohai University, Nanjing* 210098, *Jiangsu, China*)

Abstract: As one of the major grain-producing provinces, Heilongjiang Province, China is susceptible to suffering from drought risk. Drought happened much more frequently in recent years. Only a few studies focused on drought in the study area at present and most of them paid more attention to the frequency and degree of drought than the changes of the spatial-temporal characteristics of drought events. The changes of drought and the spatial-temporal characteristics of drought events in Heilongjiang Province were showed based on daily precipitation data from 1953 to 2015 by different scales of Standardized Precipitation Index (*SPI*), combined with Run-length theory. The results showed that precipitation, compared with temperature, has been the main factor related to drought. The research indicated that the *SPI* is an effective index for assessing drought conditions in Heilongjiang Province. The trend of summer drought and autumn drought was increased, while the trend of winter drought and spring drought was decreased. The summer *SPI* and autumn *SPI* were decreased with average rates of 0.029 and 0.135 per ten years respectively, while the spring *SPI* and winter *SPI* were increased with average rates of 0.061 and 0.074 per ten years separately. Annual *SPI* was decreased with an average rate of 0.044 per ten years. From the middle of 1960s to the late 1970s, drought in Heilongjiang Province happened frequently. The duration of drought events was long. The degree of drought was big and the intensity of drought was high. A consecutive drought period occurred in the years from 1974 to 1980. During this time period, droughts happened at a higher frequency and for a longer duration. The situation was comparatively normal from 1980s to the middle of 1990s. The duration, the severity and the intensity of drought events showed an increasing trend from the late 1990s. From the Northwest to the Southeast, the duration of drought events was decreased after the first increase. This study could make contribution to monitoring and assessment of drought. And it could be used in guidelines of water resource management and agricultural production.

Key words: drought; Heilongjiang Province; *SPI*; spatial-temporal characteristic